

Досліджено особливості течії й напружено-деформованого стану матеріалу при рівноканальному Т-образному пресуванні методом кінцевих елементів. Показано вплив таких факторів як тертя й зміцнення матеріалу на форму, розподіл деформацій, силовий режим при пресуванні заготовки

Ключові слова: інтенсивна пластична деформація, напруження, фактор тертя, зміцнення матеріалу

Исследованы особенности течения и напряженно-деформированного состояния материала при равноканальном Т-образном прессовании методом конечных элементов. Показано влияние таких факторов как трение и упрочнение материала на форму, распределение деформаций, силовой режим при прессовании заготовки

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, напряжение, фактор трения, упрочнение материала

The features of material flow and stress-strain state during the equal channel T-type pressing were investigated by finite element method. The influence of friction and material strain-hardening on billet shape, strain distribution and loading history during the pressing was shown

Key words: severe plastic deformation, stress, friction factor, material strain-hardening

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАВНОКАНАЛЬНОГО Т-ОБРАЗНОГО ПРЕССОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.З. Спусканюк

Доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник*

Контактный тел.: 8 (062) 311-11-23, 8 (066) 740-59-70

E-mail: vspusk@ukr.net

А.Н. Гангало

Аспирант*

Контактный тел.: 8 (062) 311-11-23, 8 (063) 266-78-19

А.Н. Давиденко

Кандидат технических наук, научный сотрудник*

*Отдел технологических исследований процессов гидропрессования

Донецкий физико-технический институт им. А.А.Галкина
НАН Украины

ул. Р.Люксембург, 72, г. Донецк, Украина, 83114

Контактный тел.: 8 (062) 311-11-23, 8 (067) 505-90-84

E-mail: dav76@ukr.net

А.П. Латаев

Ведущий инженер

ООО «Артех»

ул. Оршанская, 3, г. Москва, Россия, 121552

Контактный тел.: 8 (499) 141-95-74, 8 (910) 794-17-18

E-mail: al@artech-eng.ru

1. Введение

В последнее время стремительно развиваются методы интенсивной пластической деформации (ИПД) [1], обеспечивающие возможность проводить многоцикловую обработку заготовки и достигать сверхвысоких пластических деформаций, сохраняя поперечные размеры заготовки практически в неизменном виде. В результате такой деформационной обработки в

полученных образцах достигается целый ряд необычных физико-механических свойств [2].

Среди известных методом ИПД материалов наибольшее признание получили кручение под высоким давлением (КВД) [3], всесторонняя ковка [4], равноканальное угловое прессование (РКУП) [5-6]. Однако, до настоящего времени недостаточно исследованы технологические возможности равноканального углового прессования с истечением материала из вертикального

канала в два боковых выходных канала. Такой процесс назван равноканальным Т-образным прессованием [7], а схема его реализации представлена на рис.1.

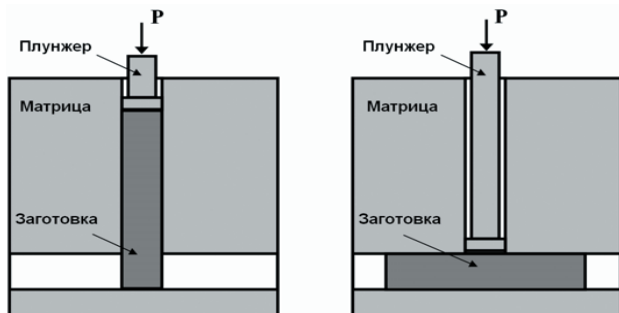


Рис. 1. Схема процесса равноканального Т-образного прессования

Целью данной работы являлось исследование особенностей течения и напряженно-деформированного состояния материала при равноканальном Т-образном прессовании методом конечных элементов (МКЭ).

2. Условия моделирования процесса

Моделировался процесс прессования через Т-образную матрицу исходного материала (первый переход многоциклового обработки). Варьировались три фактора: упрочнение материала, длина заготовки L и фактор трения m . Первый материал принят идеально пластичным (ИП) с напряжением течения $\sigma = 75,8 \text{ МПа}$. Второй материал — алюминиевый сплав 6101 (аналог АД31Е) с таким же пределом текучести и кривой упрочнения, описываемой выражением $\sigma_0 = 208\epsilon^{0,25}$, полученным экспериментально с использованием результатов осадки материала до деформации $\epsilon = 0,85$ [8]. Упругие свойства обоих материалов следующие: модуль упругости $E = 69 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,33$. Заготовки имели поперечное сечение $20 \times 20 \text{ мм}^2$, а их длина равнялась 80 либо 120 мм. При условии, что напряжение трения равно $\tau_f = m\tau$, где τ — напряжение сдвига, фактор трения принят равным $m = 0$ либо $m = 0,1$. Оснастка принята жесткой с поперечным сечением каналов, таким же, как у заготовок, радиус скругления у верхней стенки принят равным $r = 0,5 \text{ мм}$. Пуансон имел такую же форму и площадь поперечного сечения, как у заготовки, и двигался со скоростью 1 мм/с . Процесс считался изотермическим. Расчет выполнен с использованием программного обеспечения DEFORM 3D Ver. 5.0.

3. Результаты и обсуждения

3.1. Форма заготовки после Т-образного прессования в условиях отсутствия трения

На рис. 2 показаны формы образцов из ИП материала длиной 80 мм и 120 мм после прессования. Видно, что в процессе течения материала образуются зазоры, обозначенные 1, 2 и 3 (рис 2а). Для удобства будем рассматривать только левую часть рисунка, поскольку

он является симметричным. Зазоры 1 и 2 образуются между выходным концом заготовки и нижней и верхней стенками выходного канала оснастки соответственно. Причем размер зазора 1 намного больше зазора 2. Зазор 3 образуется в процессе истечения материала и увеличивается до тех пор, пока верхняя сторона заготовки не упрется в верхнюю стенку оснастки. Наблюдается соответствие между величинами угла отклонения нижней стороны заготовки от нижней стенки оснастки и зазора 3. При увеличении длины заготовки заметных изменений зазоров 1 и 2 не происходит (рис 2б). Видно, что по мере развития процесса глубина зазора 3 уменьшается в направлении к оси заготовки, достигает определенного уровня и остается практически неизменной. Участок, где отсутствует зазор 1 в условиях отсутствия трения можно считать зоной стабильного течения.

Несколько иную картину мы видим для упрочняемого материала (рис. 3). Заметно уменьшается зазор 1 и увеличивается зазор 2. При длине заготовки $L = 80 \text{ мм}$ зазор 3 почти не образуется. Увеличением длины прессуемой заготовки приводит к образованию зазора 3, который вблизи средней части заготовки практически исчезает.

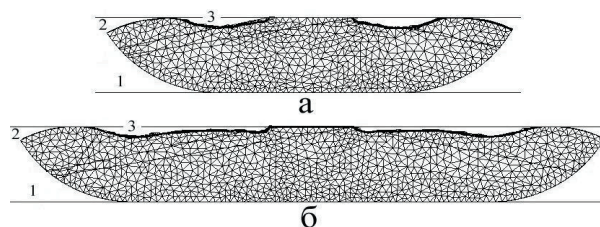


Рис. 2. Формы образцов из ИП материала после Т-образного прессования при $m = 0$ (а - $L = 80 \text{ мм}$, б - $L = 120 \text{ мм}$)

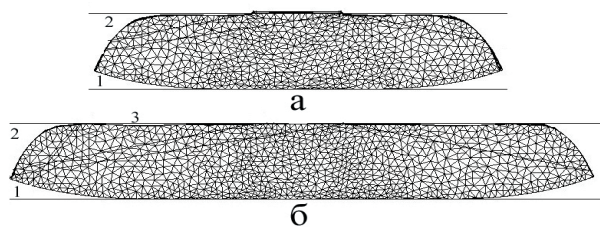


Рис. 3. Формы образцов из алюминиевого сплава 6101 после Т-образного прессования при $m = 0$ (а - $L = 80 \text{ мм}$, б - $L = 120 \text{ мм}$)

3.2. Форма заготовки после Т-образного прессования при $m = 0,1$

На рис. 4 показаны формы образцов из ИП материала длиной 80 мм и 120 мм после прессования с учетом сил трения. Видно, что трение так же, как и упрочнение, приводит к уменьшению зазоров 1, 3 и увеличению зазора 2. Увеличение длины заготовки не приводит к каким либо существенным изменениям зазоров 1 и 2, глубина зазора 3 вблизи центра уменьшается до определенного уровня и остается практически неизменной. У алюминиевого сплава 6101 при $L = 80 \text{ мм}$

(рис. 5а) образования зазора 3 не происходит, уменьшается зазор 1 и увеличивается участок зазора 2. При прессовании длинной заготовки верхняя ее сторона упирается в верхнюю стенку выходного канала, в результате чего сначала образуется зазор 3, а затем он практически исчезает (рис. 5б). Величина зазоров 1 и 2 меньше, форма прессизделия наиболее благоприятна.

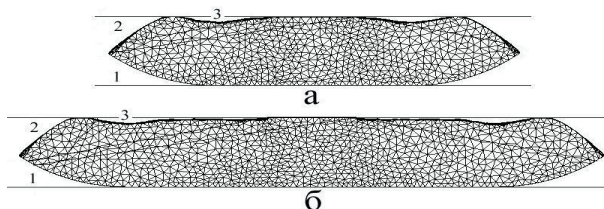


Рис. 4. Формы образцов из ИП материала после Т-образного прессования при $m=0,1$ (а - $L=80\text{мм}$, б - $L=120\text{мм}$)

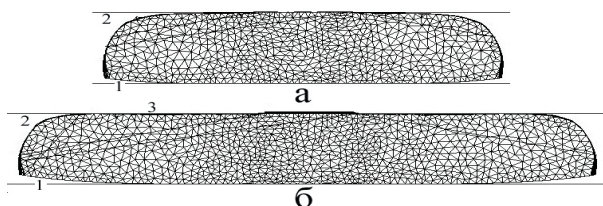


Рис. 5. Формы образцов из алюминиевого сплава 6101 после Т-образного прессования при $m=0,1$ (а - $L=80\text{мм}$, б - $L=120\text{мм}$)

3.3. Течение металла внутри образца

Для исследования течения металла в исходном образце было нанесено 10 точек (рис. 6а).

Таблица 1

Координаты точек до и после прессования

№ точки	До прессования		После прессования	
	x	y	x	y
1	-10	40	-47	17
2	-5	40	-43,5	6,3
3	0	40	21,6	0,2
4	5	40	43,3	6,7
5	10	40	47,1	16,7
6	-10	80	-30,6	18,4
7	-5	80	-21,3	9,4
8	0	80	-3,7	0,5
9	5	80	20,6	8,9
10	10	80	30,3	18,7

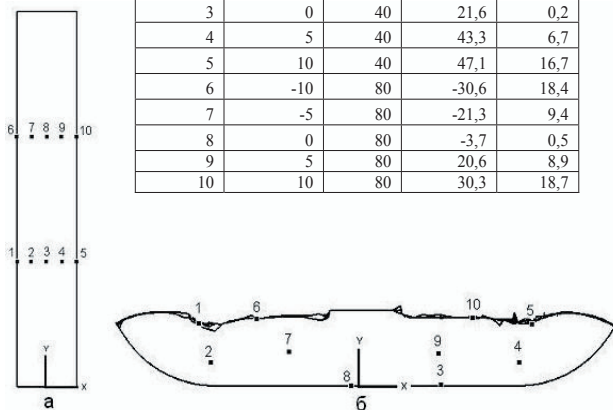


Рис. 6. Расположение точек ИП материала: а - в исходной заготовке, б - после прессования ($m=0$)

Исходя из условия, что в процессе прессования координаты точек по толщине практически не меняются, задача была принята плоской. Координаты точек до и после прессования приведены в таблице 1. Из рисунка 6б видно, что все точки, за исключением 3 и 8 располагаются симметрично оси Y. Точки 1, 6 и 5, 10, первоначально расположенные на боковых поверхностях заготовки, после прессования располагаются на верхней стороне заготовки. Точки 2, 7 и 4, 9 после прессования располагаются в середине образца практически на одной линии.

Точки 3 и 8, первоначально расположенные на оси образца, после прессования располагаются на нижней поверхности заготовки. Перетекание осевых слоев материала заготовки в нижнюю поверхность облегчает выход внутренних дефектов наружу. Точки 3 и 9 после прессования удалены от оси Y практически на одно расстояние, хотя точка 3 первоначально расположена ниже точки 9. По-видимому, скорость течения центральных слоев по нижней стенке канала наименьшая.

3.4. Сопоставление результатов физического и компьютерного моделирования

Для исследования характера течения материала проведены также эксперименты по однократному выдавливанию составных образцов сечением $20 \times 20 \text{ мм}^2$, которые состояли из двух половинок одинакового поперечного сечения, причем на вертикальной поверхности разъема одной из половинок предварительно наносилась координатная сетка.

В качестве ИП материала использовался свинец (длина образца $L=105 \text{ мм}$), а в качестве упрочняемого материала алюминиевый сплав 6061 (длина образца $L=80 \text{ мм}$). После выдавливания из вертикального канала образцы извлекались из матрицы и проводился их осмотр. (рис. 7, 8).

На рис. 7, 8 представлены довольно симметричные виды деформированной сетки (степень отклонения от симметрии зависит от различия условий контактного трения в боковых каналах). Наблюдается удовлетворительная сходимость искривления сетки при физическом и компьютерном моделировании.

Можно выделить различные зоны искривления координатной сетки: слабо искривленные ячейки на концах заготовки, зоны сильного искривления ячеек и центральную зону, где имеются участки практически не искривленных ячеек. В зоне стабильного течения угол искажения сетки уменьшается снизу вверх, что свидетельствует о меньшем уровне деформации в верхних слоях заготовки.

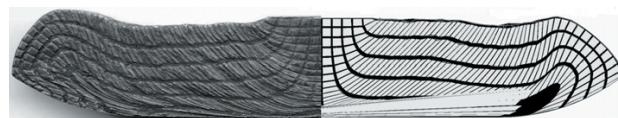


Рис. 7. Искривленные в результате деформации координатные сетки свинцовой заготовки (левая сторона - физическое моделирование, правая сторона - компьютерное моделирование)

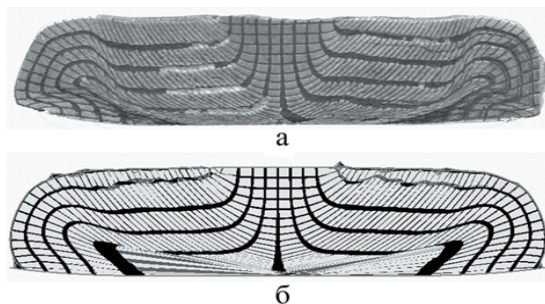


Рис. 8. Искривленные в результате деформации координатные сетки заготовки из алюминиевого сплава 6101 (а - физическое моделирование, б - компьютерное моделирование)

3.5. Распределение деформаций

На рисунке 9 показано распределение деформаций после Т-образного прессования заготовки из идеально пластичного материала при $m=0$. Видно, что распределение деформаций по сечению заготовки имеет довольно сложный характер. Как было отмечено выше, распределение деформаций симметрично относительно оси Y . На участках, соответствующих установившейся стадии процесса, интенсивность деформации уменьшается от нижней стенки заготовки к верхней. Области наименьшей деформации находятся на концах образца и в центре с верхней стороны, наибольший уровень деформации сосредоточен в зоне у начала системы координат.

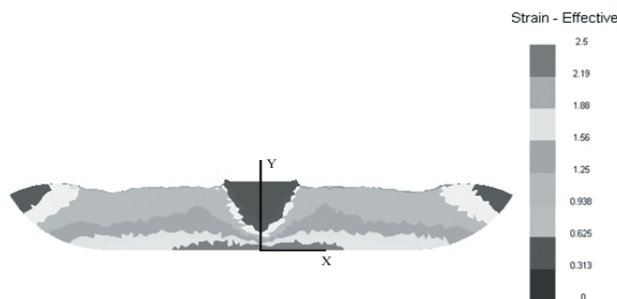


Рис. 9. Распределение деформаций в образце после Т-образного прессования для ИП материала при $m=0$

На рис. 10 показано распределение по длине части образца длиной 120 мм осредненных по сечению деформаций для различных вариаций. Поскольку деформация симметрична относительно оси Y , то приведено распределение деформаций только с одной стороны от оси Y на длине 40 мм. Увеличение рассматриваемой области более 40 мм нецелесообразно из-за сильно искривленных концов заготовки. Из рисунка видно, что деформация возрастает по мере удаления от оси образца и достигает максимальных значений при удалении на 15-20 мм, в дальнейшем прослеживается постепенный спад. Упрочнение и трение приводят к увеличению накопленной деформации. В данных условиях упрочнение материала приводит к большему приращению деформации, чем трение. Согласно решению [7] при Т-образном прессовании эквивалентная пластическая деформация материала, соответствующая установившейся стадии его течения в боковой канал матрицы, для ИП материала в условиях

отсутствия трения $\epsilon = 1,44$. Такой уровень деформации наблюдается в сечении, удаленном от оси Y на 15-20 мм

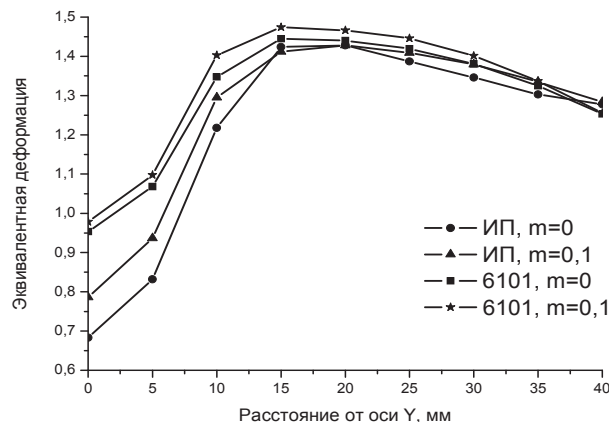


Рис. 10. Распределение осредненной деформации по длине образца при различных условиях процесса (часть образца длиной 120 мм)

Исследование распределения деформации по высоте образца проводилось в сечении, удаленном на 15 мм от оси Y (рис. 11). Видно, что деформация уменьшается снизу вверх. Неодинаковая длина кривых объясняется тем, что при рассматриваемых случаях получается разная высота образца в данном сечении вследствие различной глубины зазоров. При прессовании ИП материала наблюдается больший градиент деформации по сечению, чем для упрочняемого материала.

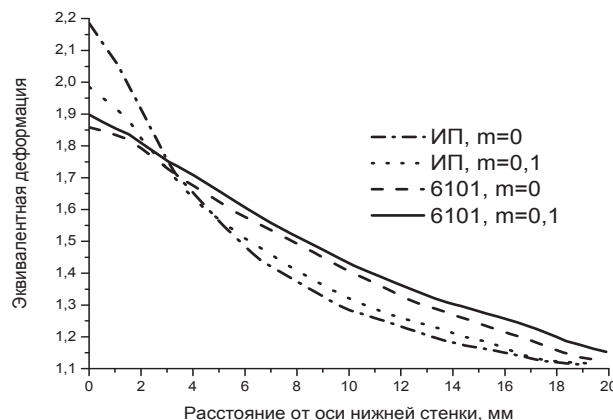


Рис. 11. Распределение деформации по высоте образца длиной 120 мм в сечении на расстоянии 15 мм от оси Y

3.6. Изменение главных максимальных напряжений

Изменение главных максимальных напряжений в микрообъемах, обозначенных (рис. 6) точками 3, 4 и 5, исследовано для случая прессования ИП материала. В начале процесса во всех точках наблюдаются сжимающие напряжения. По мере приближения рассматриваемых объемов к очагу деформации напряжения увеличиваются, причем наибольшие сжимающие напряжения соответствуют точке 5. При прохождении очага деформации сжимающие напряжения постепенно уменьшаются и возникают растягивающие, вначале в точке 5, а затем 4 и 3. В точке 5 напряжения остаются

растягивающими до конца процесса. В точке 4 материал в дальнейшем подвергается сжимающим, а затем опять растягивающим напряжениям. В точке 3 по мере протекания процесса материал подвергается растягивающим напряжениям, а в конце процесса - сжимающим.

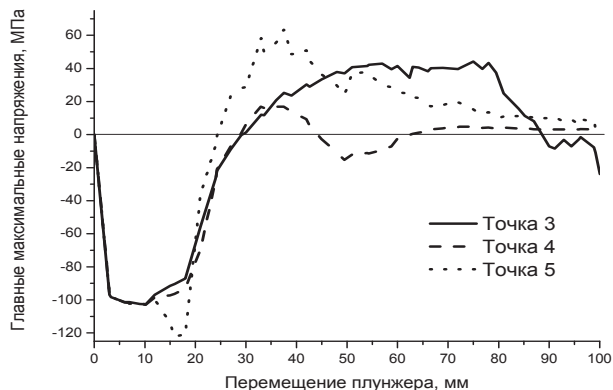


Рис. 12. Изменение главных максимальных напряжений в точках 3, 4, 5 в зависимости от перемещения пуансона

3.7. Силовой режим процесса

На рис. 15а показаны зависимости изменения силы прессования ИП материала и алюминиевого сплава 6101 от перемещения пуансона в условиях отсутствия трения.

В случае прессования ИП материала в начале процесса при перемещении пуансона около 0,5 мм сила резко возрастает, затем при пути пуансона от 0,5 до 7 мм наблюдается умеренный рост силы, после чего достигается ее максимальное значение, которое держится до конца процесса на одном уровне в пределах 44-46 кН. Резкий рост силы объясняется тем, что в первоначальном положении заготовка упирается в нижнюю стенку канала, отсутствуют зазоры между заготовкой и стенками входного канала, что исключает возможность ее осадки.

Умеренный рост силы соответствует стадии формирования очага деформации. Постоянный уровень силы объясняется отсутствием трения заготовки о стенки канала, внешнее воздействие необходимо только для осуществления работы деформации. В [7] показано, что при отсутствии трения давление прессования ИП материала составляет $2,5k$, где k - напряжение сдвига. Для данных условий напряжение сдвига равно

$$k = \frac{\sigma}{\sqrt{3}} = \frac{75,8}{\sqrt{3}} = 43,76 \text{ МПа},$$

а сила прессования

$$F = 2,5kS = 2,5 \cdot 43,76 \cdot 400 = 44 \text{ кН},$$

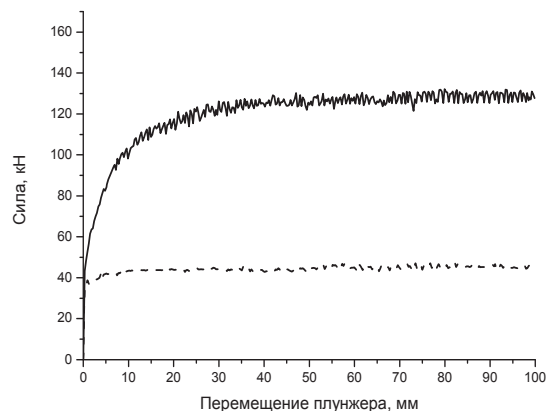
где S - площадь поперечного сечения заготовки. Видно, что результат компьютерного моделирования силы хорошо совпадает со значением, полученным аналитически в работе [7].

Кривая зависимости силы прессования от перемещения пуансона для упрочняемого алюминиевого

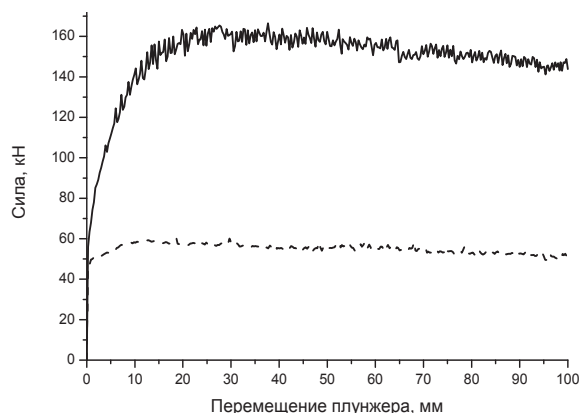
сплава 6101 имеет другой вид. Быстрый набор силы при пути пуансона 0,5 мм, умеренный рост силы на участке пути пуансона 0,5-30 мм и практически неизменный уровень силы порядка 137 кН на участке 30-100 мм пути пуансона.

Умеренный рост силы при перемещении пуансона до 30 мм связан с упрочнением материала в процессе деформации. На рис. 15б показаны зависимости силы прессования ИП материала и алюминиевого сплава 6101 от перемещения пуансона при $m=0,1$. Трение приводит к увеличению силы, необходимой для осуществления процесса. В случае прессования ИП материала при перемещении пуансона на 10 мм сила возрастает до максимального значения 60 кН, при дальнейшем протекании процесса прессования уровень силы постепенно снижается, что объясняется уменьшением площади контактной поверхности вследствие образования зазоров в выходном канале.

Для алюминиевого сплава 6101 сила увеличивается при перемещении пуансона на 30 мм до максимального значения 165 кН, далее происходит постепенный спад.



а)



б)

Рис. 13. Зависимости силы прессования заготовок длиной 120 мм от перемещения пуансона (а - $m=0$, б - $m=0,1$; пунктирная линия соответствует ИП материалу, сплошная линия соответствует алюминиевому сплаву 6101)

4. Выводы

1. Исследование течения материала показало различные степени искривления координатной сетки, отражающие малодеформированные участки на концах образца, почти недеформированную центральную зону, где имеются практически не искривленные ячейки, и сильно искривленные участки сетки материала, подвергнутого интенсивным сдвигам. В процессе прессования осевые слои материала перетекают в нижний поверхностный слой, что облегчает выход внутренних дефектов наружу. Упрочнение материала и силы трения заготовки о стенки канала улучшают форму прессизделия, что позволяет производить многоцикловое прессование без промежуточной мехобработки.

С учетом влияния этих факторов определяется минимально допустимая длина заготовки, достаточная для создания условий стабильного течения материала.

2. Распределение деформации имеет симметричный вид относительно оси Y.

По мере удаления от поперечной оси прессизделия средняя по поперечному сечению эквивалентная деформация увеличивается и на определенном расстоянии достигает предельных значений. При дальнейшем удалении от оси деформация постепенно уменьшается, что связано с концевым эффектом. По поперечному сечению прессизделия деформация уменьшается в направлении от нижней поверхности к верхней. Упрочнение и трение способствуют достижению большей деформации.

В зоне стабильного течения материала величина усредненной по сечению эквивалентной деформации имеет хорошую сходимость с аналитическим решением [7].

3. Наблюдается знакопеременное напряженное состояние материала в процессе прессования заготовки: осевые слои материала испытывают напряжения сжатия - растяжения - сжатия; промежуточные слои - сжатия - растяжения - сжатия - растяжения; боковые слои - сжатия - растяжения по ходу процесса.

4. После повышения давления прессования до максимального уровня наблюдается постепенное его

снижение до окончания процесса, что связано с уменьшением площади поверхности контакта заготовки с инструментом.

Установлена хорошая сходимость результатов моделирования силового режима и аналитического решения [7].

Литература

1. Валиев, Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства [Текст] / Р.З. Валиев, И.В. Александров – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
2. Гусев, А.И. Эффекты нанокристаллического состояния в компактных материалах и соединениях [Текст] / А.И. Гусев // УФН. – 1997. – Т. 168, №1. – С. 55-83.
3. Бриджмен, И.В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва [Текст] / И.В. Бриджмен. – М.: Изд-во иностр. лит., 1955. – 440 с.
4. Жеребцов, С.В. Формирование субмикроструктурной структуры в титановых сплавах интенсивной пластической деформацией [Текст] // С.В. Жеребцов, Р.М. Галлеев, О.Р. Валиахметов // КШП. – 1999, №7. – С. 17-22.
5. Процессы пластического структурообразования [Текст] / В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов и др. – Минск: Навука і тэхніка, 1994. – 232 с.
6. Segal, V.M. Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion (ECAE) Segal, V.M. [Текст] / V.M. Segal // Mater. Sci. Eng. A – 2004. – V. 386. – P. 269-276.
7. Спусканюк, В.З. Исследование процесса равноканального Т-образного прессования [Текст] / В.З. Спусканюк, А.А. Давиденко, А.Н. Гангало и др. // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – Луганськ, 2008. С. 53-60.
8. Patil Basavaraj, V. Study of channel angle influence on material flow and strain inhomogeneity in equal channel angular pressing using 3D finite element simulation [Текст] / V. Patil Basavaraj, Uday Chakkingal, T.S. Prasanna Kumar // J. Mater. Proc. Tech. – 2009, V. – 209. – P. 89-95.